

基于单个光调制器产生多路无线和有线信号

李韦萍^{1,2}, 孔淼^{1,2}, 石俊婷^{1,2}, 余建军^{1,2*}

¹复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;

²复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433

摘要 提出了一种采用单个光调制器生成多路无线和有线信号的系统方案, 并成功实现了两路 5 Gbaud 四相相移键控(QPSK)无线信号和一路 5 Gb/s 二进制振幅开关键控(OOK)基带信号在 80 km 单模光纤(SMF)中的有效传输。利用双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)、功率耦合器、光滤波器等器件, 实现了经济高效、结构简单的多路无线、有线双重服务, 减小了信号间干扰、光纤色散走离效应等因素的影响, 避免了传输距离的限制, 提高了系统的可靠性。实验结果表明, 5 Gb/s OOK 基带有线信号经 80 km SMF 传输后的功率代价仅为 1 dB, 承载 5 Gbaud QPSK 的 15 GHz 和 30 GHz 信号经 80 km SMF 传输后的功率代价分别为 2 dB 和 4 dB。

关键词 光纤光学; 双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM); 光纤色散; 光滤波器; 四相相移键控

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1906001

Generation of Multiple Path Wireless and Wireline Signals Based on a Single Optical Modulator

Li Weiping^{1,2}, Kong Miao^{1,2}, Shi Juntong^{1,2}, Yu Jianjun^{1,2*}

¹Key Laboratory of EMW Information, Department of Communication Science and Engineering,
Fudan University, Shanghai 200433, China;

²Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract In this study, we used a single optical modulator to generate multiple path wireless and wired signals. We successfully transmitted two channels of 5 Gbaud quadrature phase-shift keying (QPSK) wireless signal and one channel of 5 Gb/s binary amplitude on-off keying (OOK) baseband signal over 80-km single-mode fiber (SMF). By employing dual-polarization Mach-Zehnder modulator, power divider, optical filter, and other devices, we realized the dual services of multi-channel wireless and wireline signals with high-frequency efficiency and simple structure. This method reduces the influence of signal interference and optical fiber dispersion effect, avoids the limitation of transmission distance, and improves the reliability of the system. The experimental results show that the power penalty of 5 Gb/s OOK baseband wireline signal after 80-km SMF transmission is only 1 dB, and the power penalty of 15 GHz and 30 GHz signals carrying 5 Gbaud QPSK after 80-km SMF transmission are 2 dB and 4 dB, respectively.

Key words fiber optics; dual-polarization Mach-Zehnder modulator (DP-MZM); optical fiber dispersion; optical filter; quadrature phase shift keying

OCIS codes 060.4080; 060.5625; 060.2360

1 引 言

近年来,随着 5G、大数据、物联网和人工智能等各种高新技术的发展,人们对于大容量、低延时通信系统的需求急剧增长。光载无线通信(ROF)技术融合了无线通信和光纤通信的长处,具有带宽大、损

耗低、移动灵活等诸多优势,解决了电器件带宽受限和长距离传输损耗大的问题,已成为 5G 乃至未来 6G 系统中极具前景的备选方案^[1-17]。为了进一步降低下一代接入网中通信系统的成本,研究人员致力于推动有线和无线双重服务的深度融合,以经济高效的方式为终端用户提供了更多超高带宽的服务选择。

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61935005, 61922025, 61527801, 61675048, 61835002, 61805043)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61720106015)

* E-mail: comdtu2019@gmail.com

一些实验已经证明在 ROF 系统中可同时生成和传输独立的无线和有线信号^[15-20]。文献[15-16]中,研究者采用电吸收调制器(EAM)同时生成了基带信号和毫米波信号,但为了克服信号间的串扰以及 EAM 引起的非线性,信号传输采用了色散位移光纤(DSF)。此外,无线信号的传输速率相对较低,仅为 155 Mb/s。文献[17]中使用单个双臂马赫-曾德尔调制器(MZM)同时产生了独立的有线、无线信号,并以较低成本实现了超高速有线和无线双重服务,但该系统存在有线、无线信号间相互干扰的问题,并且受双边带引起的光纤色散走离效应^[21]的影响,光纤传输距离受限,产生了一定的功率损失,影响了系统的可靠性。实验结果显示,无线信号的最大传输速率为 2.5 Gb/s。在以上方案中,生成的无线信号都只有一路,系统利用率有待提升。然而使用并行或级联多个 MZM 同时生成无线和有线信号的方法中^[18-20],系统传输速率较低,最高为 1.25 Gb/s,另外,由于采用多种电子或光学设备,系统的结构相对复杂,且对滤波器的性能要求很高。

针对上述缺陷,本文提出了一种采用双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)生成多路无线和有线信号的系统方案,实现了系统简单、成本低廉的高速有线和无线双重服务,并通过实验成功实现了两路 5 Gbaud(baud 为是数据通信速度的表示单位,表示通信线路状态每秒钟变化的次数)四相相移键控(QPSK)无线信号和一路 5 Gb/s 二进制振幅键控(OOK)基带信号在 80 km 单模光纤(SMF)中的有效传输。本系统中利用功率耦合器将两路无线

信号耦合为一,采用偏振复用技术,将独立的无线和有线信号加载到相互正交的光偏振态上,从而避免了两者在光电探测器(PD)中拍频时的相互串扰。通过使用光滤波器,将原双边带信号变为单边带信号,减小了双边带调制下光纤色散走离效应的影响,经过光纤传输后的光信号不需要进行色散补偿,故可实现一定长度的可靠传输。系统结构简单,复杂度低,调制效率高,用低廉的成本提供了可靠性高的有线和无线双重服务,在未来接入网中将发挥巨大的优势。

2 多路无线和有线融合传输 ROF 系统原理

通过单个调制器生成两路不同频率射频信号和一路基带信号的系统原理如图 1 所示。系统中采用的调制器为 DP-MZM,这是一种集成光学器件,由一个偏振分束器(PBS)、一个偏振合束器(PBC)以及两个子调制器(MZM1 和 MZM2)集成。激光器产生单一频率激光,作为光载波接入 DP-MZM 的光输入端。两路无线数据信号频移至无线频段,分别由频率为 f_1 和 f_2 的射频承载,然后经功率耦合器耦合成一,基带有线信号则通过信号发生器直接产生。接着,无线信号和基带有线信号分别接入 DP-MZM 的两个电输入端,且两个子 MZM 的直流(DC)偏置均设于正交点(QTP)。其中,耦合后的无线信号在 X 偏振方向上驱动 MZM1, MZM1 将无线信号调制到光毫米波副载波上,实现了双边带调制[简化的光谱如图 1(a)所示]。基带有线信号

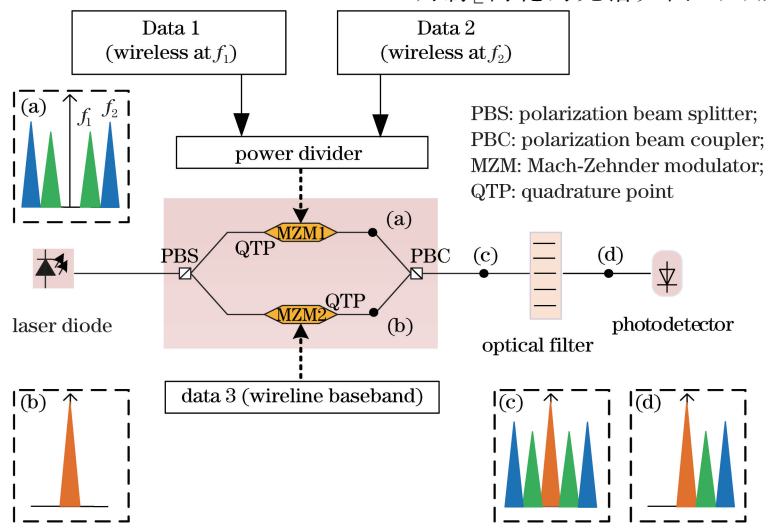


图 1 利用一个调制器生成两路不同频率的光射频信号和一路基带信号的原理。(a)~(d)不同光路对应的简化光频谱

Fig. 1 Simultaneous generation of two independent optical RF signals with different frequencies and a baseband signal by a modulator. (a)~(d) optical spectra detected at corresponding optical path

在 Y 偏振方向驱动 MZM2, MZM2 将基带有线信号调制到光载波上[简化的光谱如图 1(b)所示]。这样, DP-MZM 将无线和有线信号分别调制到了光的两个正交偏振态上, 从而避免两种信号在接收端光电探测器(PD)中的相互干扰, 从 DP-MZM 输出的信号的简化光谱如图 1(c)所示。

双边带调制下, 上下两个边带的频率分量分别为 $f_0 + f$ 和 $f_0 - f$, 其中 f_0 代表光载波频率, f 代表射频频率。由于光纤色度色散的影响, 不同的频率分量在光纤中传播时有着不同的速度, 从而产生不同的延时。由频率为 $f_0 + f$ 的光波所承载的信号和由频率为 $f_0 - f$ 的光波所承载的信号的码边沿将会因逐渐走离(walk-off)而错开, 两个信号的同步传输遭到破坏, 造成符号间干扰和误码率增加, 影响了系统的可靠性。如果只有一个光分量承载基带数据, 则可以避免这个问题。所以双边带信号进入 PD 之前, 我们使用光滤波器滤除其中一个边带,

只剩余一个承载数据信号的边带进入 PD 中, 这样就保证 PD 中不会出现这种走离效应, 进而实现一定长度的可靠传输。这里的光滤波器可以选用可调谐光纤或波分复用滤波器、梳状滤波器或其他光学元件。最后从光滤波器输出的光信号[简化的光谱如图 1(d)所示]经过 PD 后即可得到电域的有线信号和无线信号。

本系统通过使用 DP-MZM、功率耦合器、光滤波器等器件, 实现了经济高效、结构简单的多路无线、有线双重服务, 减小了信号间干扰、光纤色散走离效应等因素的影响, 避免传输距离限制的同时提高了系统的可靠性。

3 实验装置及结果

采用单个调制器产生多路无线和有线信号的 ROF 系统实验装置如图 2 所示, 关键器件的参数如表 1 所示。

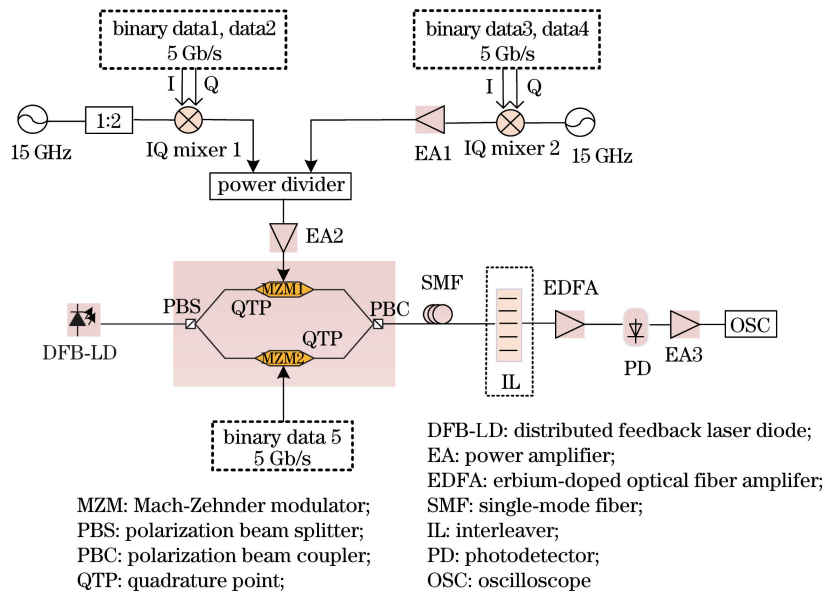


图 2 利用单个光调制器产生多路无线和有线信号的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for generation of multiple path wireless and wireline signals by a single modulator

分布反馈布拉格半导体激光器(DFB-LD)用于产生波长为 1551.6 nm 的光载波, 接入 DP-MZM 的光输入端(本实验采用的 DP-MZM 型号为 FTM7981EDA)。正弦发生器产生 15 GHz 正弦波, 经二倍频器后频率增倍至 30 GHz, 随后 30 GHz 正弦信号通过 IQ 混频器(IQ mixer1)与 I 路、Q 路 QPSK 二进制数据混频, 上变频后产生频率为 30 GHz 的 QPSK 射频信号。另外一路由正弦发生器产生的 15 GHz 正弦波信号直接通过 IQ 混频器(IQ mixer2)与 I 路、Q 路 QPSK 二进制数据混频,

上变频产生频率为 15 GHz 的 QPSK 射频信号, 经电放大器(EA1)放大后, 和另外一路射频信号进入功率耦合器中。功率耦合器将两路射频信号耦合成一, 输出信号经电放大器(EA2)放大后在 X 偏振方向上驱动 MZM1, 生成 QPSK 光毫米波信号。其中, I 路、Q 路二进制数据字长为 $2^{10} - 1$, 峰峰值为 $1V_{pp}$, 发送速率为 5 Gb/s, 电放大器 EA2 输出后的信号峰峰值为 $2V_{pp}$ 。OOK 基带电信号则是由数模转换器直接产生, 并在 Y 偏振方向上驱动 MZM2, 其数据特征与上述相同。这 5 路 5 Gb/s 二进制信

表 1 实验装置关键器件参数

Table 1 Key device parameters in the experimental setup

Device	Parameter
IQ mixer1	Operated at 24–37 GHz; insertion loss; 9 dB
IQ mixer2	Operated at 10–20 GHz; insertion loss; 16 dB
EA1,EA2	DC, ~32 GHz, 20 dB gain
Interleaver	100/200 GHz
DP-MZM	3 dB bandwidth: 30 GHz; insertion loss: 6.2 dB; polarization isolation larger than 20 dB
PD	3 dB bandwidth: 75 GHz
EA3	DC, ~60 GHz
Real time	3 dB bandwidth: 62 GHz;
OSC	sampling rate: 160 GSa/s

号由 5 个同步的不同信号源产生,而且经过了不同长度电缆传输后相互错开,他们之间没有相关性。

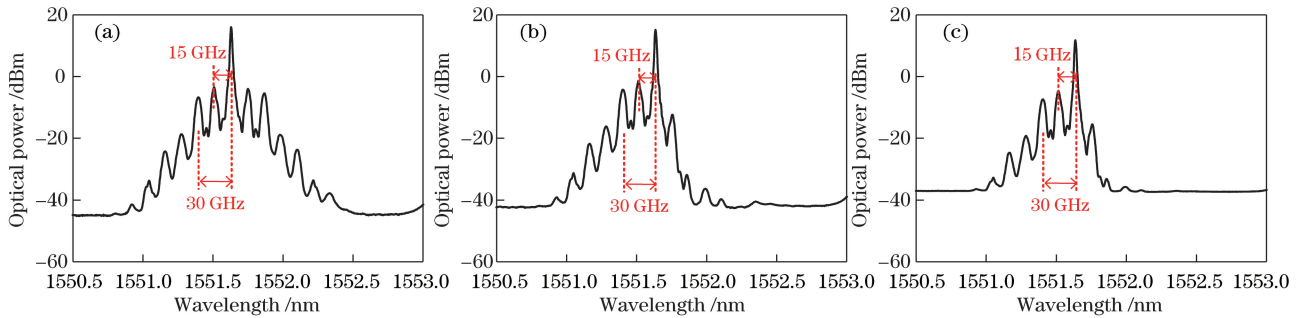


图 3 输出信号光谱。(a)经 BTB 传输;(b)经 IL 传输;(c)经 80 km SMF+IL 传输

Fig. 3 Output optical spectra. (a) After BTB; (b) after IL; (c) after 80 km SMF and IL

图 4 给出了多种情况下,5 Gb/s OOK 基带信号误码率(BER, R_{BE})与输入 PD 光功率的关系曲线

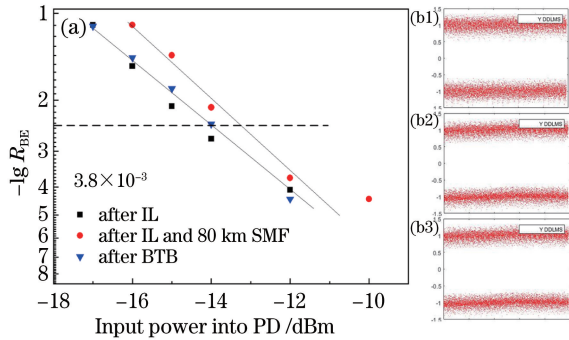


图 4 5 Gb/s OOK 基带信号误码率曲线及星座图。(a)误码率曲线;(b1)经 BTB 传输后的星座图;(b2)经 IL 传输后的星座图;(b3)经 IL 和 80 km SMF 传输后的星座图

Fig. 4 BER curves of 5 Gb/s OOK baseband signal and constellation diagrams. (a) BER curves; (b1) constellation diagram after BTB; (b2) constellation diagram after IL; (b3) constellation diagram after IL and 80 km SMF

两路偏振态信号经 PBC 耦合后进行传输,此时 DP-MZM 输出信号的光功率为 0 dBm。本实验中选择输入/输出频率间隔为 100/200 GHz 的光交错复用器(IL)作为光滤波器。IL 的输出信号经掺铒光纤放大器(EDFA)功率放大后进入 75 GHz 的 PD 中直接检测,转换为电基带、电毫米波混合信号。电信号经过电放大器(EA3)放大,并被实时数字存储示波器(OSC)接收。最后对捕获的信号进行离线数字信号处理器(DSP)处理^[6],处理过程包括:下变频、恒模算法均衡(CMA)、频偏估计以及相位估计等步骤。随后测量了从 DP-MZM 输出的信号进行背靠背(BTB)传输后的光谱[图 3(a)],系统中加入 IL 后的输出信号光谱[图 3(b)],以及 DP-MZM 输出的信号经 80 km SMF 和 IL 后的输出信号光谱[图 3(c)]。

线以及接收信号的星座图。图 4(b1)展示了基带信号经 BTB 传输,接收端恢复出的 OOK 信号星座图;图 4(b2)展示了基带信号经 IL 滤波,接收端恢复出的 OOK 信号星座图;图 4(b3)展示了基带信号通过 80 km SMF 传输并经 IL 滤波后接收端恢复出的 OOK 信号星座图。在实验中,调整输入到 PD 中的光功率数值,随着输入功率的增加,光信噪比逐渐上升,使得 BER 呈下降趋势。在 BTB 传输条件下,当 PD 的输入功率高于 -14.1 dBm 时,OOK 信号的 BER 小于硬判决前向纠错(HD-FEC)阈值 3.8×10^{-3} ,并且对于基带信号的传输,系统中加入 IL 所引起的性能下降几乎可以忽略不计。这是因为 OOK 基带信号承载在光载波上,系统中 IL 的加入,不会对光载波造成影响。根据关系曲线,可以看到系统信号通过 80 km SMF 传输并经 IL 滤波后,由光信噪比下降所引起的功率代价约为 1 dB。

图 5 和图 6 给出了多种情况下,15 GHz 和 30 GHz 射频上的 5 Gbaud QPSK 信号 BER 与输入 PD 光功率的关系曲线以及接收信号的星座图。

图 5(b1)、图 6(b1)展示了信号经 BTB 传输,接收端恢复出的信号星座图,图 5(b2)、图 6(b2)展示了系统中加入 IL 后,接收端恢复出的信号星座图,图 5(b3)、图 6(b3)展示了信号通过 80 km SMF 传输并经 IL 滤波后接收端恢复出的信号星座图。从图中我们可以看出,随着输入到 PD 中光功率数值的增加,光信噪比逐渐上升,BER 呈现下降趋势。在 BTB 传输条件下,当 PD 的输入功率高于 -8 dBm

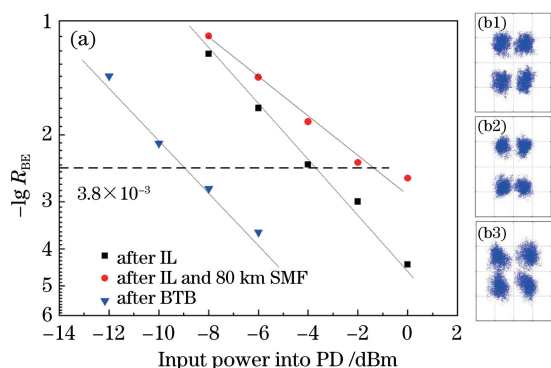


图 5 15 GHz 射频上的 5 Gbaud QPSK 无线信号误码率曲线及星座图。(a)误码率曲线;(b1)经 BTB 传输后的星座图;(b2)经 IL 传输后的星座图;(b3)经 IL 和 80 km SMF 传输后的星座图

Fig. 5 5 Gbaud QPSK wireless BER curves at 15 GHz and constellation diagrams. (a) BER curves; (b1) constellation diagram after BTB; (b2) constellation diagram after IL; (b3) constellation diagram after IL and 80 km SMF

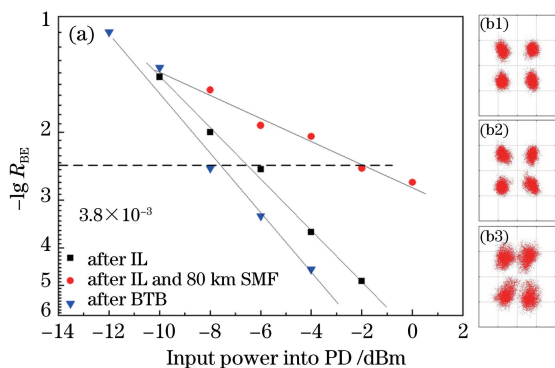


图 6 30 GHz 射频上的 5 Gbaud QPSK 无线信号误码率曲线及星座图。(a)误码率曲线;(b1)经 BTB 传输后的星座图;(b2)经 IL 传输后的星座图;(b3)经 IL 和 80 km SMF 传输后的星座图

Fig. 6 5 Gbaud QPSK wireless BER curves at 30 GHz and constellation diagrams. (a) BER curves; (b1) constellation diagram after BTB; (b2) constellation diagram after IL; (b3) constellation diagram after IL and 80 km SMF

时,30 GHz 信号 BER 小于 HD-FEC 阈值 3.8×10^{-3} 。系统中 IL 的加入,导致 15 GHz 和 30 GHz 射频信号各产生 1.8 dB 左右的功率损失,这是因为 IL 的加入,滤除了双边带信号的一边有效信号,因而需要一定的功率补偿才能得到相同的 BER。继续观察曲线,可以发现:信号经 80 km SMF 传输、IL 滤波后,由于光信噪比的下降,15 GHz 和 30 GHz 信号经 80 km SMF 传输的功率代价分别为 2 dB 和 4 dB,且都高于基带信号经 80 km SMF 传输的功率代价 1 dB。这是因为 30 GHz 光毫米波频率较高,光纤对其的色散影响会更加严重,同时器件在不同频段有着不同的特性,所以 30 GHz 射频信号经 80 km SMF 传输受到的损失超过了 15 GHz 的射频信号以及基带信号。

4 结 论

提出了一种采用 DP-MZM 生成多路无线和有线信号的系统方案,并通过实验成功实现了两路 5 Gbaud QPSK 无线信号和一路 5 Gb/s OOK 基带信号在 80 km SMF 中的有效传输,从而验证了该方案的优越性和可行性。实验中利用功率耦合器将两路 5 Gbaud 的 QPSK 信号耦合为一路,采用偏振复用技术,将独立的无线和有线信号加载到相互正交的光偏振态上,避免了两者在 PD 中的相互串扰。同时使用光滤波器,将原双边带信号变为单边带信号,减小了双边带调制下光纤色散走离效应的影响。实验结果表明,5 Gb/s OOK 基带有线信号经 80 km SMF 传输后的功率代价仅为 1 dB,承载 5 Gbaud QPSK 的 15 GHz 和 30 GHz 信号经 80 km SMF 传输后的功率代价分别为 2 dB 和 4 dB。

参 考 文 献

- [1] Yu J J, Jia Z S, Yi L, et al. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 265-267.
- [2] Liu L M, Dong Z, Pi Y Z, et al. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 148-153.
刘丽敏,董泽,皮雅稚,等.采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统 [J]. 中国激光, 2009, 36(1): 148-153.
- [3] Zhang Y, Liu B, Ji S. Generation of multiple-frequency optical millimeter-wave signal with optical carrier suppression and no optical filter [J]. IEEE

- Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-7.
- [4] Hu Z Y, Qiu Y, Li W T, et al. Experimental demonstration of direct re-modulation for an IM/DD OFDM-WDM-PON with symmetrical bi-directional transmission [J]. Optics Communications, 2020, 460: 125123.
- [5] Yeh C H, Chow C W, Wei L Y. Symmetric >67 Gbps OFDM-IMDD based WDM access network for mitigating Rayleigh backscattering interference noise[J]. Optics Communications, 2020, 454: 124504.
- [6] Yu J J, Zhou X. Ultra-high-capacity DWDM transmission system for 100G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(3): S56-S64.
- [7] Jia Z S, Yu J J, Ellinas G, et al. A novel full-duplex wavelength-reuse optical-wireless architecture with directly modulated SOA as upstream colorless amplified modulator[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2007, OThM: OThM2.
- [8] Chen L, Shao Y F, Lei X Y, et al. A novel radio-over-fiber system with wavelength reuse for upstream data connection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 387-389.
- [9] Jia Z S, Yu J J, Boivin D, et al. Bidirectional ROF links using optically up-converted DPSK for downstream and remodulated OOK for upstream[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(9): 653-655.
- [10] Jia Z S, Yu J J, Chang G K. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(16): 1726-1728.
- [11] Chen D Y, Sun W M, Qin S C, et al. A fully integrated CMOS limiter and RSSI circuits for modem optical communications[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(2): 167-174.
陈殿玉, 孙伟明, 秦世才, 等. 现代光通讯中的全集成 CMOS 限幅器及场强指示电路[J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 167-174.
- [12] Liu A L, Yin H X, Wu B, et al. Phase-shift characteristics of radio frequency signals for radio over fiber transmission systems[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0506003.
刘安良, 殷洪玺, 吴宾, 等. 光载无线通信系统射频信号相移特性研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0506003.
- [13] Quadrupled Vector Signal and Wavelength Reuse[J]. Chinese J. Lasers, 2018, 45(10): 1006005.
庄云圣, 潘炜, 叶佳, 等. 基于四倍频矢量信号和波长重用的双向光载无线系统 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1006005.
- [14] Xue Z Z, Pei L, Xie Y H, et al. Filterless 24-tupling frequency millimeter-wave generator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006001.
薛壮壮, 裴丽, 解宇恒, 等. 无滤波 24 倍频光载毫米波发生器 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006001.
- [15] Kamisaka T, Kuri T, Kitayama K. Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 2013-2017.
- [16] Ikeda K, Kuri T, Kitayama K. Simultaneous three-band modulation and fiber-optic transmission of 2.5-Gb/s baseband, microwave-, and 60-GHz-band signals on a single wavelength[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3194-3202.
- [17] Jia Z S, Yu J J, Chowdhury A, et al. Simultaneous generation of independent wired and wireless services using a single modulator in millimeter-wave-band radio-over-fiber systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1691-1693.
- [18] Zhang L, Hu X F, Cao P, et al. Simultaneous generation of independent wired and 60-GHz wireless signals in an integrated WDM-PON-RoF system based on frequency-sextupling and OCS-DPSK modulation[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 14648-14655.
- [19] Wei J, Jun C. Design of WDM-RoF-PON for wireless and wire-line access with source-free ONUs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(2): 127-133.
- [20] Xiang Y, Chen C, Zhang C F, et al. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by polarization multiplexed FWM in SOA[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1218-1225.
- [21] Ma J X, Yu J, Yu C X, et al. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3244-3256.